

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problems Mailbox.**

LIGHT SELF-GUIDE OPTICAL CIRCUIT

Patent Number: JP2000056146
Publication date: 2000-02-25
Inventor(s): KOSAKA HIDEO; KAWAKAMI SHOJIRO
Applicant(s):: NEC CORP
Requested Patent: ☐ JP2000056146 (JP00056146)
Application Number: JP19980221243 19980805
Priority Number(s):
IPC Classification: G02B6/12
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light self-guide optical circuit which can be made small- sized and lightweight, highly integrated, and speeded up and has excellent transmission efficiency.

SOLUTION: This light self-guide optical circuit is an optical circuit which constitutes an optical path by allowing light or an electromagnetic wave to travel in a space by itself, uses photonic crystals 2, 3 and 4 having dielectric constant cyclic or semicyclic structure having cycles substantially corresponding to the wavelength of the light propagated in the optical path, and forms the optical path by setting the crystal azimuths so that the dispersion surfaces of the photonic crystals become flat, thereby obtaining parallel luminous flux having high parallelism on a light self-guide basis. The photonic crystals 2, 3 and 4 are formed partially in the optical circuit board 5 and a laser 1, a photodetecting element 6 and an optical fiber 7 are connected to an end surface of this optical circuit board 5. Those three photonic crystals are arranged having their crystal azimuths selected so as to obtain parallel luminous flux, branching, and deflection respectively.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2000-56146

(P 2000-56146A)

(43) 公開日 平成12年2月25日 (2000. 2. 25)

(51) Int. Cl. 7

識別記号

F I

テーマコード (参考)

G 0 2 B 6/12

G 0 2 B 6/12

J 2H047

審査請求 有 請求項の数 7

O L

(全 8 頁)

(21) 出願番号 特願平10-221243

(22) 出願日 平成10年8月5日 (1998. 8. 5)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 小坂 英男

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(72) 発明者 川上 彰二郎

宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 東北大学電気通信研究所内

(74) 代理人 100096231

弁理士 稲垣 清

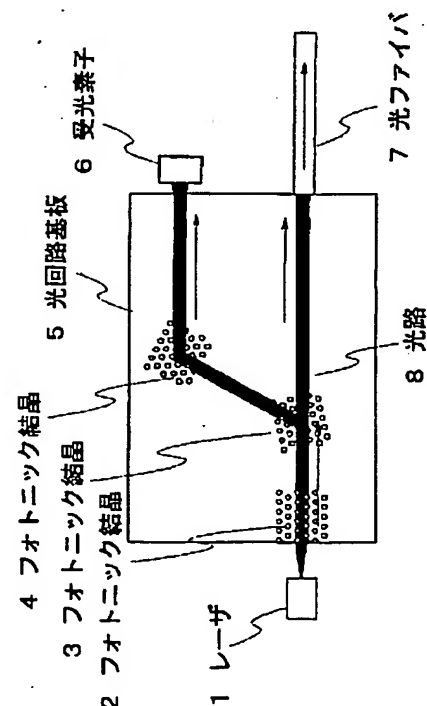
F ターム (参考) 2H047 BB00 BB02 BB05 BB11 CC00
CC05 GG07

(54) 【発明の名称】 自己導波光回路

(57) 【要約】

【課題】 小型・軽量化、高集積化、及び高速化が可能であり、良好な伝送効率を示す自己導波光回路を提供することである。

【解決手段】 本自己導波光回路は、光又は電磁波を空間内で自己導波的に伝播させて光路を構成するようにした光回路であって、光路を伝播する伝播光の波長に実質的に相当する周期の誘電率周期構造又は準周期構造を持つフォトニック結晶2、3、4を用い、フォトニック結晶の分散面が平坦になる方向に結晶方位を設定して光路を形成し、自己導波的に平行度の高い平行光線束を得る。光回路基板5内に部分的にフォトニック結晶2、3および4が形成され、この光回路基板5の端面にレーザー1、受光素子6、光ファイバ7が接続されている。これら3つのフォトニック結晶はそれぞれ平行光線束、分岐、屈曲を得るように結晶方位を選んで配置されている。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光又は電磁波を空間内で自己導波的に伝播させて光路を構成するようにした光回路であって、光路を伝播する伝播光の波長に実質的に相当する周期の誘電率周期構造又は準周期構造を持つフォトニック結晶を用い、フォトニック結晶の分散面が平坦になる方向に結晶方位を設定して光路を形成し、自己導波的に平行度の高い平行光線束を得るようにしたことを特徴とする自己導波光回路。

【請求項 2】 フォトニック結晶の誘電率周期構造を変化させることにより、平行光線束を維持しながらフォトニック結晶内の光路を所定の曲率半径で屈曲させることを特徴とする請求項 1 に記載の自己導波光回路。

【請求項 3】 意図的に平行光線条件からずらし、かつ分散面が凸状となる結晶方位を選ぶことにより所定の光線広がり形成し、光を広範囲に分配するようにしたことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の自己導波光回路。

【請求項 4】 意図的に平行光線条件からずらし、かつ分散面が凹状となる結晶方位を選ぶことにより所定の光線集束を形成し、光を集束することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の自己導波光回路。

【請求項 5】 フォトニック結晶が光回路基板に形成されていることを特徴とする請求項 1 から 4 のうちのいずれか 1 項に記載の自己導波光回路。

【請求項 6】 フォトニック結晶の入射端からレーザ、LED、光ファイバなどの光素子を直接自己導波光回路に接続することにより、低発散角の伝播光をフォトニック結晶の出射端から出射することを特徴とする請求項 5 に記載の自己導波光回路。

【請求項 7】 請求項 1 から 6 のうちのいずれか 1 項に記載の自己導波光回路を有することを特徴とする光集積回路。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、自己導波光回路に関し、更に詳細には、容易に、小型・軽量化、高集積化、及び高速化でき、かつ良好な伝送効率を有し、特に光通信、光制御、光情報処理等の分野の使用に最適な自己導波光回路に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、光回路は、自由空間伝播型光回路と導波路型光回路とに大別される。自由空間伝播型光回路は、導波路を形成することなく、自由空間内でコリメータ、レンズ、反射鏡などの個別光部品を組み合わせて光の経路を規定して光回路を構成したものである。個別光部品のうち平行光線束を得るためのコリメータには、レンズ又は凹面鏡を用い、レンズまたは凹面鏡の焦点位置に小さい光源又はスリットやピンホールを置き、これらの位置を微妙に調整することにより、平行光線束を得

ている。

【0003】導波路型光回路は、一般的には、屈折率の異なる材料を線路状に埋め込んで導波路を形成し、屈折率の異なる材料の光の全反射条件を用いて光を導波して光回路を構成したものである。この導波路型光回路の一例として、高橋らによって、1992年発行の電子情報通信学会春季大会予稿第4分冊の第272頁に、開示されたアレイ導波路格子(AWG)の平面構造図を図3に示す。この例では、Si基板からなる導波路基板51上に石英系の光導波路を形成しており、導波路型光回路は、11本の入力光導波路52、凹面構造のスラブ導波路からなる入力側スターカップラ53、アレイ導波路格子54、出力側スターカップラ55、及び出力導波路56からなる。

【0004】また、導波路型光回路の別の例として、フォトニック結晶に線状の欠陥構造を意図的に導入し、この線状欠陥に沿って光を導波又は屈曲させる可能性が報告されている。例えば、A. Mekisらによって、1996年にPhysical Review Lettersのvol. 28、第3787頁に、開示されたフォトニック結晶による光導波路回路の平面構造図を図4に示す。尚、図4は本明細書に添付して提出した第1参考写真を複写したものである。この導波原理を簡単に説明すると、完全結晶では光伝播状態の存在しなかった波長帯に、導波モードが線状欠陥の導入によって形成され、このモードを選択的に励起する入射光は、この線状欠陥に沿って導波されるものである。また、この屈曲の原理を簡単に説明すると、光の伝播モードは、屈曲部においても、上述した線状欠陥内の導波モードしか存在せず、従って、入射側導波路から屈曲部に入射した光は、出射側導波路以外に出口を持たないため、急峻な屈曲が、放射損失なく実現できるものである。

【0005】更に、構造的な導波路を必要とせず自己的に導波伝播する効果として自己集束(セルフフォーカシング)現象の利用が考えられる。この現象は、例えばProgress in Optics (E. Wolf編集)の第XII巻の第6頁に記載されている。この現象を簡単に説明すると、以下ようになる。媒質内での光の屈折率は、光が強くなるにつれて、僅かながら大きくなる。このため、強い光束が媒質を通過すると、強度の大きい中心部の位相速度が、強度の小さい周辺部より遅くなるため、波面が内部に湾曲してくる。一方、光束は、回折のため広がろうとするが、もし十分に光が強くて、屈折率の影響の方が大きいときには、この光束はある距離を伝播したところで、一点に集束してしまう。従って、屈折率の影響のと回折の影響が、丁度、釣り合った状況を考えれば、この光束は、一定の広がり幅を保ったまま平行束として伝播することになる。この屈折率の光強度依存性は、カー効果と呼ばれる媒質の持つ3次の非線型屈折率の効果であり、光強度の2乗に比例した依

存性を示す。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上述した従来の自由空間伝播光回路及び導波路型光回路には、それぞれ、以下のような課題がある。まず、自由空間伝播光回路には、コリメータに付随する問題がある。第1の問題点は、光源又はピンホールの位置の位置決め精度、すなわち入射光の発散角に厳しい条件が課せられることである。これは、光部品の位置合わせに高い精度を要求し、実装コストを高くする要因となる。第2の問題点は、コリメータ自身が大きく、このために大きな設置容積を要することである。それは、光源又はピンホールが点光源とみなせる程度に大きなレンズを使用する必要があるからである。また、この結果、出射光のスポットサイズは、光源又はピンホールのサイズよりかなり大きくなってしまいうという副次的な問題も生じる。

【0007】導波路型光回路では、急峻な角度で導波路を屈曲させることが難しく、現状ではcmオーダーの曲率半径が必要となるために、回路全体がcmオーダーの大きさになって小型化が難しいという問題がある。それは、前述のように光の導波原理として光の全反射条件を用いており、急激な曲げは、大きな放射損失を招くことになるからである。

【0008】フォトニック結晶を用いた光導波回路では、まず、光の伝播状態の全く存在しない波長帯を持つ完全結晶を形成し、次いで線状の欠陥構造を導入する必要があるものの、現状では完全結晶を実現することは、技術的に難しい。特に、完全結晶中に意図的に欠陥構造を導入して、線状又は屈曲導波路を形成することは、技術的に極めて難しい。例えば、現在、光通信に用いられている光の波長帯である $1.5\mu\text{m}$ 付近では、このような線状又は屈曲導波路構造を構成するには、少なくとも $0.1\mu\text{m}$ オーダーの加工制御性と高いアスペクト比が必要となり、現状の技術では極めて困難である。

【0009】セルフフォーカシングを用いた自己導波回路では、同効果が光の強度の2乗に比例しているため、回折広がりとの均衡を得るためには、光強度の精密な制御が必要である。更に、この均衡条件を保つためには、光強度の定常性を保証する必要があるが、一般的に、非線型性の大きな波長帯では、共鳴効果のために吸収も大きく、伝播方向に沿って光の強度が減衰する現象を避けることは難しい。もちろん、この吸収効果の少ない非共鳴域でも、ある程度非線形定数を持つが、この場合には、光強度を十分大きくする必要があり、情報処理又は短距離の光接続を目的とする光回路においては、非現実的な値(ワット級)となる。

【0010】以上の説明から判るように、コリメータを必要とする自由空間伝播光回路は大型になり、また導波路型光回路では、大きな曲率半径を必要とするために大型になり、従来の光回路では、いずれも、小型・軽量

化、高集積化、及び高速化が難しく、また従って、伝送効率の向上も難しかった。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、上記課題の克服して、小型・軽量化、高集積化、及び高速化が可能であり、良好な伝送効率を示す光回路を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】本発明者は、目的の光回路を実現するには、次の要件が、必要であると考えた。

(1) まず、第1に条件は、レンズの様な個別部品を使うことなく、mmサイズ以下に小型化できることである。

(2) また、第2の条件は、実装に伴う位置合わせの工程を不要とすることである。

(3) 第3の条件は、微弱な入射光においても、平行光線束が得られ、その状態が媒質の吸収の影響を受けることなく保存されることである。しかも、その平行度が、入射光の広がり角に大きく依存せず一定で、光回路に適用できる程度に十分小さなビーム幅を得ることである。このような直進性の導波機能に合せて、放射損失を伴わず急峻な屈曲を可能とすることにより、結果的に、回路全体を小型化、高集積化して、目的の光回路を得ることができる。また、これらの小型化、集積化によって、光回路の総合的な製造コストを大幅に低減できることになる。

【0013】上記目的を達成するために、本発明に係る自己導波光回路は、光又は電磁波を空間内で自己導波的に伝播させて光路を構成するようにした光回路であって、光路を伝播する伝播光の波長に実質的に相当する周期の誘電率周期構造又は準周期構造を持つフォトニック結晶を用い、フォトニック結晶の分散面が平坦になる方向に結晶方位を設定して光路を形成し、自己導波的に平行度の高い平行光線束を得るようにしたことを特徴としている。

【0014】好適には、フォトニック結晶の誘電率周期構造を変化させることにより、平行光線束を維持しながらフォトニック結晶内の光路を所定の曲率半径で屈曲させる。また、意図的に平行光線条件からずらし、かつ分散面が凸状となる結晶方位を選ぶことにより所定の光線広がりを形成し、光を広範囲に分配する。更には、意図的に平行光線条件からずらし、かつ分散面が凹状となる結晶方位を選ぶことにより所定の光線集束を形成し、光を集束する。好適には、フォトニック結晶が光回路基板に形成されている。また、フォトニック結晶の入射端からレーザ、LED、光ファイバなどの光素子を直接自己導波光回路に接続することにより、低発散角の伝播光をフォトニック結晶の出射端から出射する。本発明は、次に説明するように、フォトニック結晶の特異的な分散面を利用することによって、本発明の目的を達成してい

る。

【0015】本発明で使用するフォトニック結晶は、相互に異なる誘電率を持つ2種類以上の媒質が周期的又は準周期的に配置されたものである。その一例として、面内方向に3角格子配置、層方向に2層交代周期を持つ3次元フォトニック結晶を図5に示す。図5に示したフォトニック結晶のある波長に対応する分散面の一つは、図6の右側の図形に示すような形状となることが、フォトニックバンド計算から分かる。結晶内の伝播光は、入射光の結晶面に対して横方向の波数 k を保存し、この分散面における法線方向に向かうことが分かっている。ところで、入射光の横方向波数 k には、ある程度の広がり Δk があり、この広がりに応じて結晶内での伝播方向に分布が生じる。今、図6に示す a の波数に対応する入射光を入射したとすると、図6から判るように、分散面に大きな曲率を持っているため、伝播方向には大きな広がりが生じる。

【0016】ところが、 b の波数では、分散面の曲率が、下に凸から上に凸へと変化する変曲点に対応しており、局所的に直線的な分散面となっている。従って、この b に対応する波数の入射光が入射すると、伝播光の広がり、近似的にゼロとなり、平行束となることが分かる。仮に、入射光の角度広がりを 4° としたときの、結晶内伝播角広がりの入射角依存性を図7に示す。入射角 8° では、結晶内伝播角広がりは約 70° と大きく広がるが、入射角 15° においてはほぼ 0° と平行光線束となることが分かる。この状況を実際に作り出し、測定した結果は、図8に示す通りである。入射光の広がり角 4° に対して明らかに平行化されていることが分かる。尚、図8(a)及び(b)は本明細書に添付して提出した第2参考写真(a)及び(b)をそれぞれ複写したものである。

【0017】また、上述の屈曲については、次に説明する実施形態例1で、図1に示したように、光導波基板内にフォトニック結晶領域を分割して配置することにより、任意の方向に制御することが可能となる。このことは、図6に示した分散面が、入射端面の回転によって相対的に回転して見えることから理解できる。つまり、入射面の平行な方向の k 保存則が、結晶面の回転により制御できることを示している。

【0018】

【発明の実施の形態】以下に、実施形態例を挙げ、添付図面を参照して、本発明の実施の形態を具体的かつ詳細に説明する。

実施形態例1

本実施形態例は、本発明に係る自己導波光回路の実施形態の一例であって、図1は本実施形態例と自己導波光回路の構造を示す模式図である。本実施形態例の自己導波光回路は、図1に示すように、光回路基板5と、それぞれ、光回路基板5の端面に接続されたレーザ1、受光素

子6、及び光ファイバ7とから構成される。光回路基板5内には部分的にフォトニック結晶2、3及び4が形成されている。後述するように、光は、レーザ1からフォトニック結晶2、3及び4を介して受光素子に伝播し、また、フォトニック結晶3から分岐して光ファイバ7に入る構造となっている。

【0019】フォトニック結晶2、3及び4の具体的な構成及び構造は、図5に示し、前述した構成及び構造を有するフォトニック結晶であって、Si基板上に SiO_2 バッファが堆積されており、この上面の三角格子状の凹凸を反映して SiO_2 層とアモルファスSi(a-Si)層が交互に3次元周期的に積層されている。但し、これら3つのフォトニック結晶は、それぞれ平行光線束、分岐、屈曲を得るように結晶方位を選んで配置されている。 SiO_2 の屈折率は1.46、a-Siの屈折率は3.24であり、それぞれ、 $0.16\mu m$ の層厚で20対が積層されている。面内の格子定数(格子間ピッチ)は $0.33\mu m$ となっている。入射光の波長は $0.956\mu m$ であり、これらの構造定数から規格化周波数は、0.33となる。この時の分散面は、図6に示すようになっており、この分散面から図7のような伝播光の発散角と入射角の関係が得られる。従って、入射光の発散角を 4° とすると、伝播光は、入射角が 8° のとき、図8(a)に示すように、約 70° で扇状に発散し、入射角 15° のとき、図8(b)に示すように、ほぼ平行光線束となって伝播する。

【0020】以下に、図1を参照して実施形態例1の自己導波光回路の動作を説明する。レーザ1からの出射光は、フォトニック結晶2に入射する。この結晶方位は図6に示す b の方位に選んである。レーザからの出射角は、 4° としてあるので、前述したように、結晶内での伝播光は、平行光線束となっている。その後、光は、フォトニック結晶3に入射し、ここで互いに約 60° の角をなす二つの光線に分岐する。この条件は、図6に示す c に対応するものである。2本の出射光のうち一方は、光ファイバ7に直接入射する。他方は、フォトニック結晶4に入射し、ここで再度約 60° の角度に戻され、受光素子6に入射する。このフォトニック結晶4は、図6に示す b の条件を用いながらも、結晶方位をフォトニック結晶2に対して 60° 回転させてあるために、このような屈曲が得られる。

【0021】このような構成により、レーザ1からの入射光は、光路8のように光回路基板5内を伝播し、受光素子6と光ファイバ7に分離入射される。従って、レーザ1の出力強度を部分的に受光素子6でモニターしながら光ファイバ7に入射することが可能となる。フォトニック結晶2、3および4は、説明上距離を離して配置されているが、実際には間隙なく接続されている。

【0022】実施形態例2

本実施形態例は、本発明に係る自己導波光回路の実施形

態の別の例であって、図2は本実施形態例の自己導波光回路の構造を示す模式図である。本実施形態例の自己導波光回路は、図2に示すように、全面的にフォトニック結晶12が形成されている光回路基板13を備え、光回路基板13の端面に入射側光ファイバ11と、出射側光ファイバ14とが接続された構造となっている。フォトニック結晶12の構成は、図5に示し、前述したものと同一のものである。但し、このフォトニック結晶12の方位は、図6に示すaの条件となるよう選んである。

【0023】以下に、図2を参照して実施形態例2の自己導波光回路の動作を説明する。入射側光ファイバ11からの出射光は、フォトニック結晶12に入射する。この結晶方位は、図6に示すaの方位に選んであるので、図8(a)に示すように扇状に広がることになる。扇状に広げられた伝播光は、反対面に複数配置された出射側光ファイバ14に分割して入射することになる。フォトニック結晶からの出射光は、入射光の伝播角を保存しているため、出射側ファイバとの光結合が良好であることがこの構成の利点である。

【0024】実施形態例1及び2では、3次元周期構造のフォトニック結晶を用いたが、スラブ構造の光回路基板に2次元周期アレイ状に屈折率分布を設けた2次元周期フォトニック結晶を用いても同様の効果が期待できる。また、三角格子の代わりに正方格子など他の周期構造でも、同様の効果が期待でき、更に、周期構造の代わりに、ペンローズタイリングなどの準周期構造又は液晶などを用いたモザイク構造（アモルファス構造）でも、同様の効果が期待できる。実施形態例1では、フォトニック結晶をブロック状に分けて配置したが、段階的に分布を変化することによっても、同様の効果が期待できる。また、実施形態例2では、段階的な分布を持たせることにより、又は凸レンズの効果を組み合わせることにより、出射側光ファイバ14に効率的に光を導入することも可能である。また、実施形態例1及び2では、Si層とSiO₂層の周期構造を用いているが、誘電率の大きく異なる2種類以上の媒質を用いることにより、同様の効果が期待できる。例えば実施形態例の構造でも、SiO₂の層のみを選択的にエッチングして、Si層と空気層の周期構造にしても、同様の効果が得られる。

【0025】

【発明の効果】本発明によれば、光又は電磁波を空間的に伝播させて回路を構成する光回路において、伝播光の波長に実質的に相当する周期の誘電率周期構造又は準周期構造を持つフォトニック結晶を用い、その分散面が平坦になる方向に結晶方位を採ることにより、自己導波的に平行度の高い平行光線束を得るようにしている。これにより、以下の効果を奏することができる。第1の効果は、小型・軽量化、高集積化、高速化、伝送効率向上などの特性・性能の向上挙げられる。その理由は、レンズ等の個別光学部品を使用する必要がなく平行光線束が得

られ、また伝播光の大きな屈折角が得られるため、余分な曲率半径を持つ屈曲部を設ける必要がないからである。第2の効果は、生産性の向上である。その理由は、第1の効果により、素子サイズが小さくなり、同一面積のウエハから取れる素子数が多くなるからである。また、個別光学部品の実装に伴う位置合わせ工程が不要となることによっても、生産性が向上する。第3の効果は、微弱な入射光であっても、平行光線束が得られ、基板材料の吸収の影響を受けず、この平行光線束が保存されることである。しかも、その平行度が入射光の広がり角に大きく依存せず一定で、光回路に適用できる程度に十分小さなビーム幅を得ることである。本発明に係る自己導波光回路を適用することにより、低い生産コストで良好な光装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】実施形態例1の自己導波光回路の構成を示す模式図である。

【図2】実施形態例2の自己導波光回路の構成を示す模式図である。

【図3】従来例のアレイ導波路格子の構造概略図である。

【図4】従来例のフォトニック結晶による光導波路回路の平面構造を示す概略図である。

【図5】本発明に係る自己導波光回路に使用するフォトニック結晶の構成を示す斜視図である。

【図6】実施形態例で使用したフォトニック結晶の分散面を示す図面である。

【図7】実施形態例で使用したフォトニック結晶の内部伝播光の発散角の入射角依存性を示すグラフである。

【図8】図8(a)及び(b)は、実施形態例で使用したフォトニック結晶の内部伝播光のCCD観測像を示す図面である。

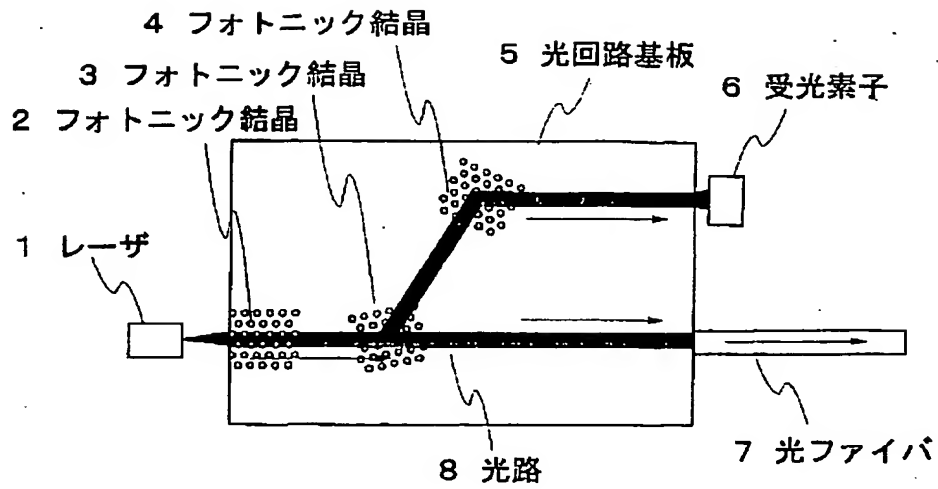
【符号の説明】

- 1 レーザ
- 2 フォトニック結晶
- 3 フォトニック結晶
- 4 フォトニック結晶
- 5 光回路基板
- 6 受光素子
- 7 光ファイバ
- 8 光路
- 11 入射側光ファイバ
- 12 フォトニック結晶
- 13 光回路基板
- 14 出射側光ファイバ
- 15 光路
- 51 導波路基板
- 52 入力光導波路
- 53 入力側スターカップラ
- 54 アレイ導波路格子

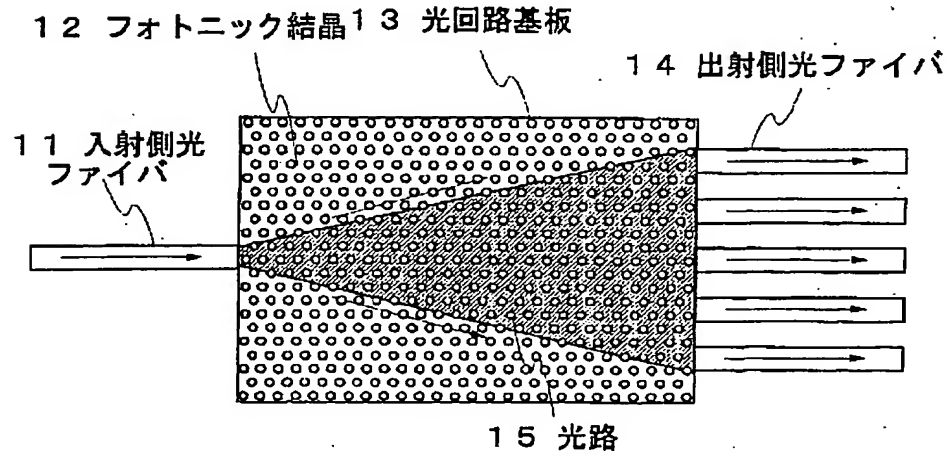
55 出力側スターカップラ

56 出力導波路

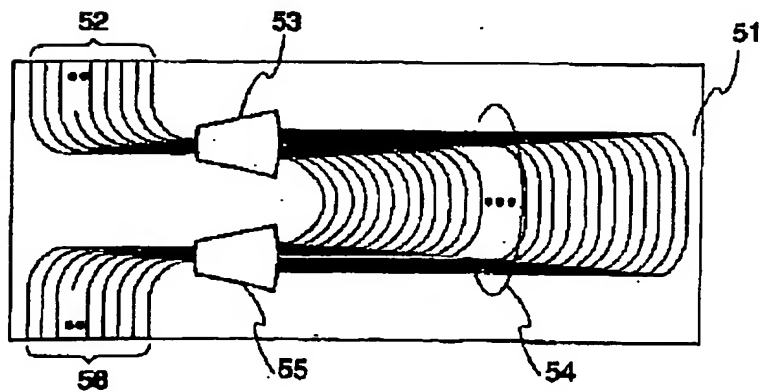
【図1】



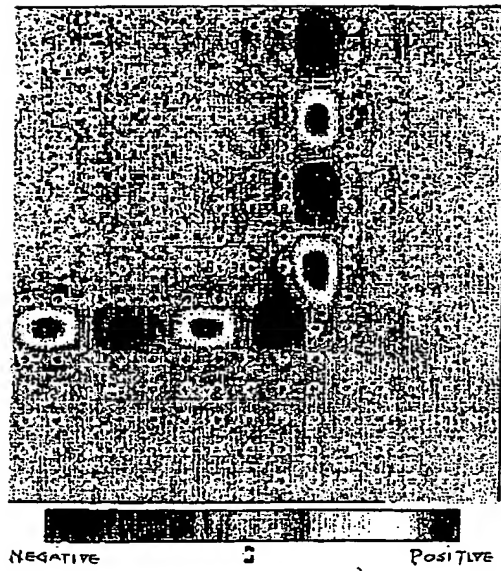
【図2】



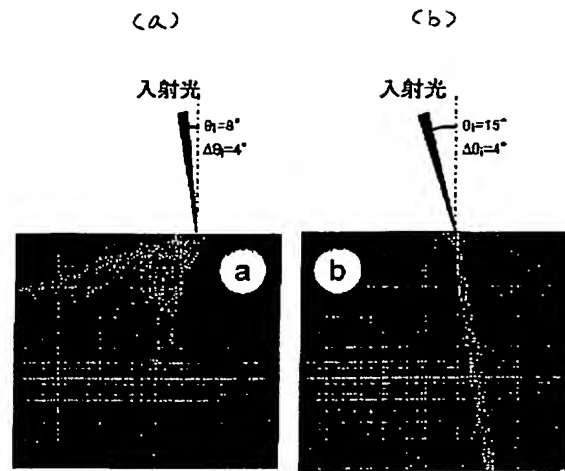
【図3】



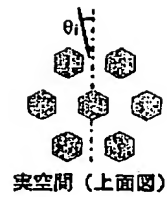
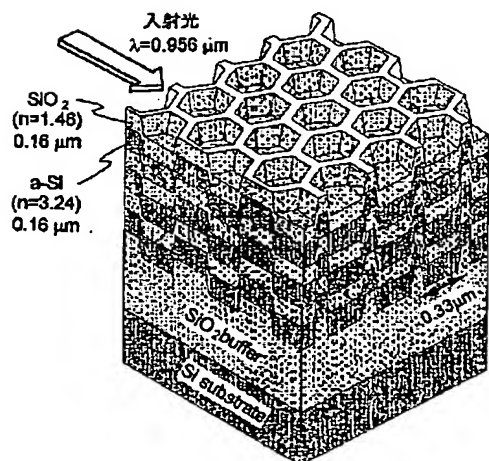
【図 4】



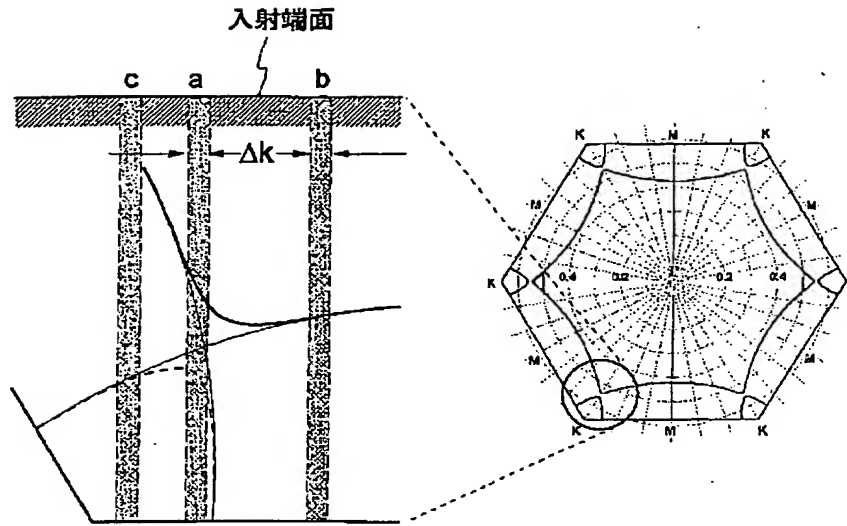
【図 8】



【図 5】



【図 6】



【図 7】

